

Análise de Capacidade e Nível de Serviço de Segmentos Básicos de Rodovias utilizando o HCM 2000

Referência:

TRB (2000) *Highway Capacity Manual. Special Report 209*. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, EUA, 4ª ed. revisada. Capítulos 12, 13, 21 e 23

ANÁLISE DE CAPACIDADE E NÍVEL DE SERVIÇO DE RODOVIAS

Sergio Henrique Demarchi
Universidade Estadual de Maringá

José Reynaldo A. Setti
Universidade de São Paulo

1. INTRODUÇÃO

A avaliação de capacidade e nível de serviço de rodovias é um dos aspectos com qual se deparam engenheiros de tráfego, analistas e planejadores de sistemas de transporte, seja durante o processo de planejamento, projeto ou operação do sistema.

A capacidade de uma rodovia corresponde ao maior número de veículos que podem ser acomodados em uma rodovia, enquanto que o nível de serviço corresponde à qualidade de operação da rodovia, o que reflete, de certa forma, o nível de fluidez da corrente de tráfego, a possibilidade de realizar manobras de ultrapassagem ou de mudança de faixa, e o grau de proximidade entre veículos. De uma forma geral, quanto menor o fluxo de veículos, melhor a qualidade de operação. Por outro lado, quanto mais o fluxo se aproxima da capacidade, pior será o nível de serviço, pois maior é a probabilidade de ocorrerem congestionamentos.

De uma forma geral, a análise de capacidade e nível de serviço permite responder questões do tipo:

- qual a qualidade da operação nos períodos de pico e qual o nível de crescimento do tráfego que pode ser suportado pelo sistema nas condições atuais?
- qual o nível de oferta necessário para que um determinado nível de demanda veicular possa ser satisfatoriamente atendida?
- quantas faixas de tráfego são necessárias para atender aos volumes médios diários de tráfego em uma rodovia?
- qual o tipo de rodovia atende de forma adequada a demanda gerada por um novo empreendimento imobiliário?

Para responder às perguntas acima, são utilizadas técnicas e métodos que permitem quantificar a capacidade de rodovias e avaliar qualitativamente a operação a partir de parâmetros mensuráveis na prática. Basicamente a análise de capacidade e nível de serviço de rodovias fornece subsídios para quatro tipos distintos de atividades relacionadas à Engenharia de Transportes:

1. A determinação da oferta, ou seja, do dimensionamento da capacidade para uma nova rodovia a ser construída;
2. A determinação das características operacionais e da qualidade de operação de rodovias já existentes, visando implantar melhorias físicas ou modificações na operação;
3. A análise dos impactos no tráfego em função da implantação de um empreendimento imobiliário que se caracteriza como pólo gerador de viagens;

4. A realização de estudos rotineiros de capacidade e nível de serviço de rodovias, visando caracterizar a operação do sistema e fornecer elementos para o desenvolvimento de políticas de transporte que sejam vinculadas à interesses globais da sociedade.

1.1. Métodos para Análise de Capacidade e Nível de Serviço

Existem diferentes métodos que foram desenvolvidos a partir de resultados de pesquisas realizadas nos últimos 40 anos, principalmente nos Estados Unidos, Canadá, Austrália e Alemanha, e que culminaram na publicação de manuais para análise de capacidade e da qualidade operacional de sistemas de transporte. Dentre esses manuais, provavelmente o mais conhecido é o *Highway Capacity Manual – HCM* (TRB, 2000), o manual americano de capacidade.

Atualmente o HCM encontra-se disponível em sua 4^a versão, contendo métodos e procedimentos que foram atualizados a partir das edições anteriores de 1950, 1965 e 1998, ou completamente modificados a partir dos resultados das pesquisas realizadas no período. Embora tenha sido desenvolvido para aplicação nos Estados Unidos, o manual é utilizado em diversos países, principalmente naqueles que ainda não possuem um manual de capacidade nacional, tais como o Brasil.

Deve ser enfatizado, no entanto, que a utilização do HCM em países cujas características dos sistemas de transportes sejam significativamente distintas das condições americanas deve ser feita com cautela, procurando sempre que possível realizar ajustes nos coeficientes ou fatores calibrados especificamente para os Estados Unidos. Algumas pesquisas vem sendo realizadas no Brasil buscando adaptar partes do manual às condições brasileiras, mas os resultados obtidos ainda não possuem abrangência nacional que permita a elaboração de um manual de capacidade brasileiro. Apesar disso, o manual americano ainda é uma das melhores alternativas para a análise de capacidade no Brasil, em função de sua facilidade de utilização dos procedimentos e disponibilização de métodos para avaliação de praticamente todos os tipos de sistemas de transporte terrestres.

1.2. Organização do HCM

Os procedimentos apresentados no HCM servem para estimar a capacidade e a qualidade da operação dos diversos componentes dos sistemas de transporte, tais como vias urbanas, rodovias, interseções, transporte público de passageiros, vias de pedestres e ciclovias. Para cada componente, existe um procedimento básico e, para facilitar a exposição dos procedimentos, o HCM classifica os componentes do sistema de transporte de acordo com o tipo controle de tráfego adotado e em função do componente analisado

1.2.1. Classificação em Função do Tipo de Controle de Tráfego

O HCM classifica os componentes de um sistema rodoviário em duas categorias, de acordo com o tipo de controle de tráfego adotado: os de *fluxo ininterrupto ou contínuo* de tráfego e os de *fluxo interrompido*.

Os componentes de fluxo contínuo são aqueles nos quais não são utilizados dispositivos, tais como semáforos, que interrompem periodicamente a corrente de tráfego, e as condições de tráfego observadas decorrem exclusivamente das interações entre veículos e das ca-

racterísticas geométricas e ambientais da via. Exemplos desses componentes podem ser encontrados na maior extensão das rodovias de pista dupla ou simples de uma rede rodoviária.

Nos componentes que apresentam fluxo interrompido, são utilizados dispositivos de controle, tais como semáforos e placas de parada obrigatória, que forcem a parada completa ou redução significativa da velocidade dos veículos. Exemplos desses componentes são as vias urbanas, interseções semaforizadas, faixas de acesso em uma rodovia principal.

Deve ser notada que a classificação de um componente do sistema de transporte como sendo de *fluxo contínuo* ou de *fluxo interrompido* refere-se basicamente à utilização ou não de dispositivos de controle do tráfego. Assim, uma rodovia que apresenta um intenso congestionamento com a interrupção completa do fluxo veicular por um determinado instante é classificada como um componente em que o fluxo é contínuo, pois a redução de velocidade ou parada completa dos veículos ocorre em função da intensidade do fluxo de tráfego, não em função da utilização de um sistema de controle de tráfego.

No próximo item são classificados os principais componentes do sistema viário nos quais o fluxo é contínuo, tendo como critério o tipo de rodovia. A análise de elementos nos quais o fluxo é interrompido está fora do escopo desse texto.

1.2.2. Classificação em Função do Tipo de Rodovia

O texto aqui apresentado tem por objetivo a análise e capacidade de trechos de fluxo contínuo de rodovias de pista dupla ou de pista simples. As rodovias de pista dupla podem ser classificadas em duas categorias: rodovias expressas ou convencionais.

Rodovias de Pista Dupla Expressas

As rodovias expressas, ou auto-estradas (Figura 1), são rodovias compostas por duas ou mais faixas de tráfego para cada sentido de tráfego, com separação central entre pistas de sentidos opostos. Nessas rodovias, a entrada ou saída dos veículos é feita de forma controlada somente nos locais em que existem faixas exclusivas para acesso ou interconexões em desnível com outras rodovias. São também conhecidas como “freeways”, conforme nomenclatura do HCM, e tem por propósito principal a mobilidade dos veículos e a fluidez da corrente de tráfego.

Deve ser mencionado que as freeways são compostas por segmentos básicos, junções e interconexões e trechos de entrelaçamento de fluxos conflitantes. Cada um desses elementos é analisado por um método distinto. Entretanto, nesse texto só são abordados os procedimentos para análise de capacidade e nível de serviço para os trechos básicos de rodovias expressas.

Rodovias de Pista Dupla Convencionais

As rodovias de pista dupla convencionais (Figura 2), denominadas pelo HCM como “multilane highways”, são rodovias em que o controle de acesso é menos limitado do que nas



Figura 1: Rodovia de pista dupla do tipo “freeway” (TRB, 2000, Ilustração 13-2, p. 13-6)



Figura 2: Trecho urbano de uma rodovia de pista dupla convencional (TRB, 2000, Ilustração 12-2, p. 12-1)



Figura 3: Rodovia de pista dupla rural. (TRB, 2000, Ilustração 12-9, p. 12-11)

“freeways” e, em alguns casos, podem não apresentar qualquer tipo de separação física (exceto a pintura de uma faixa contínua no pavimento) entre pistas de sentidos opostos. Nessas rodovias, o nível de mobilidade pode ser parcialmente comprometido de forma a melhorar a acessibilidade, e a entrada ou saída dos veículos na rodovia pode ser feita sem a utilização de faixas exclusivas para acesso.

Rodovias de Pista Simples

As rodovias de pista simples (Figura 3), denominadas pelo HCM de “two-lane highways” são rodovias formadas por duas faixas de tráfego, uma para cada sentido, sem separação central entre faixas. Nesse tipo de rodovia, a ultrapassagem sobre veículos mais lentos deve ser realizada na faixa de tráfego de sentido oposto, durante intervalos entre veículos consecutivos de duração suficiente e em locais com distância de visibilidade adequada. Assim, em rodovias de pista simples nas quais o volume de tráfego e as restrições geométricas

aumentam, a possibilidade de realização de manobras de ultrapassagem diminui, causando a formação de pelotões e o aumento do atraso proporcionado aos motoristas impossibilitados de ultrapassar de imediato.

2. CARACTERÍSTICAS DO FLUXO DE VEÍCULOS

Nos trechos de rodovias em que os fluxos de tráfego são contínuos, existe uma relação fundamental de tráfego, definida pela equação:

$$q = vk \tag{1}$$

em que q : volume ou taxa de fluxo (veíc/h);
 v : velocidade espacial da corrente de tráfego (km/h);
 k : densidade da corrente de tráfego (veíc/km)

Além da relação fundamental, é comum relacionar as variáveis de tráfego através de relações entre pares de variáveis, sendo bastante comum a utilização da relação fluxo-velocidade na análise da capacidade de rodovias.

Nas rodovias de pista dupla, o formato da relação fluxo-velocidade é, em geral, semelhante ao mostrado na Figura 4. Nessas rodovias, as características as condições do fluxo podem ser altamente variáveis, dependendo das condições a jusante e a montante de pontos de estrangulamento, que podem ser causados por áreas de entrelaçamento, rampas de acesso, redução do número de faixas de tráfego, atividades de construção ou manutenção, acidentes

ou objetos na pista. Um incidente não precisa bloquear uma faixa para causar o aparecimento de um ponto de estrangulamento; veículos parados no acostamento ou no canteiro central podem afetar o fluxo nas faixas de tráfego.

Num segmento de freeway, o fluxo de veículos pode ser categorizado em três regimes que ocorrem em condições diferentes de tráfego, como ilustrado na Figura 4.

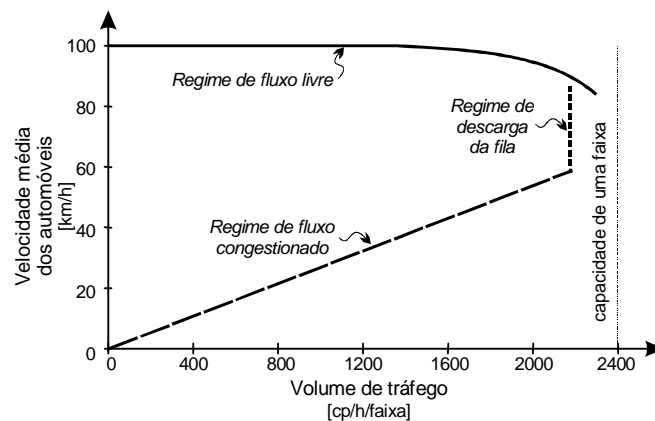


Figura 4: Regimes de fluxo em freeways (baseado em TRB, 2000, Figura 13-4, p. 13-5)

O *regime de fluxo livre* representa o tráfego quando não é influenciado pelas condições (congestionamento) a jusante ou a montante da seção e é definido dentro de uma faixa de variação de velocidades que varia entre 90 a 130 km/h, para taxas de fluxo mais baixas, e entre 70 e 110 km/h, para taxas de fluxo mais altas.

O *regime de descarga da fila* representa o tráfego que acaba de passar por um ponto de estrangulamento e está acelerando para retornar à velocidade de fluxo livre da freeway. A taxa de fluxo no regime de descarga da fila é constante, desde que não haja a influência de um outro ponto de estrangulamento a jusante. Este tipo de regime é definido por uma faixa relativamente estreita de volumes (2.000 a 2.300 veic/h/faixa), com velocidades variando entre 60 km/h e a velocidade de fluxo livre do segmento, com as velocidades mais baixas sendo observadas imediatamente a jusante do ponto em que a fila está se dissipando. A velocidade média do fluxo de descarga da fila alcança a velocidade livre do segmento mais ou menos 1 km a jusante do ponto de estrangulamento, dependendo do alinhamento vertical e horizontal da freeway. O HCM afirma que existem evidências empíricas que o fluxo de descarga da fila é cerca de 5% menor que o fluxo máximo observado antes da formação do congestionamento.

O *regime de fluxo congestionado* ocorre num trecho a montante de um ponto de estrangulamento, ou seja, na fila formada no congestionamento, que pode se estender por centenas de metros a jusante do ponto de estrangulamento. As taxas de fluxo e a velocidade variam dentro de uma ampla faixa, dependendo do grau de obstrução. Deve-se ressaltar que as filas, numa freeway, não são estáticas como num cruzamento semaforizado, mas os veículos movem-se lentamente ao longo da fila, alternando períodos de parada com períodos de movimento.

Em rodovias de pista simples, a maior complexidade em se representar adequadamente a grande variação de velocidades que ocorre em situações de congestionamento faz com que

apenas a parte da curva fluxo-velocidade referente ao regime de fluxo livre (Figura 5) determinada com razoável precisão.

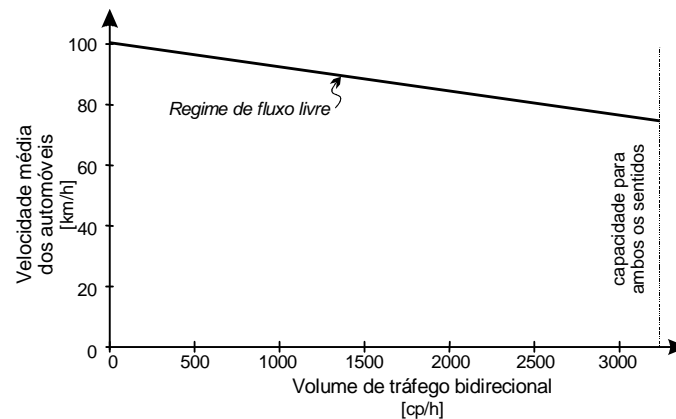


Figura 5: Regime de fluxo livre para rodovias de pista simples (baseado em TRB, 2000, Figura 12-6, p. 12-14)

3. ANÁLISE DE CAPACIDADE DE RODOVIAS

A avaliação das condições operacionais de uma rodovia baseia-se na estimativa do número de veículos que podem transitar por ela, em um certo período de tempo, de forma que um determinado nível de qualidade da operação seja mantido. As estimativas do número de veículos e da qualidade da operação são obtidas através do uso de um método de análise de capacidade e nível de serviço de rodovias. Este método permite avaliar como a capacidade e o nível de serviço de uma rodovia variam em função das características do tráfego e da via. Dentre as características do tráfego relevantes para a análise, destacam-se o volume e porcentagem de caminhões e, dentre as características da via, são importantes a largura da faixa de tráfego, o comprimento e magnitude de rampas ascendentes ou descendentes.

3.1. Definição

A *capacidade* de uma rodovia é definida pelo HCM (TRB, 1998) como a quantidade máxima esperada de veículos que cruzam uma determinada seção da rodovia durante um período de tempo em que as condições predominantes de tráfego, de controle e as características geométricas da via não se alteram significativamente. A partir dessa definição, são ressaltados os seguintes aspectos:

- A capacidade é definida para condições predominantes de tráfego, de controle e da geometria viária, ou seja, tais condições devem razoavelmente constantes para um determinado segmento de rodovia analisado. Qualquer alteração num dos aspectos mencionados pode resultar em alterações na capacidade do trecho analisado. A definição de capacidade pressupõe ainda que as condições incluem tempo bom, pavimento em bom estado e nenhuma obstrução temporária da corrente de tráfego.
- A capacidade deve ser definida para um ponto ou segmento da via, com características de tráfego, controle e geometria uniformes em toda a seção considerada (por exemplo, trechos em rampa ascendentes ou com um menor número de faixas de tráfego possuem menor capacidade que trechos planos ou trechos em que o número de faixas é maior). Assim, trechos de rodovia com condições diferentes possuem capacidades distintas.

- A capacidade é definida em termos de uma expectativa razoável de ocorrência, ou seja, ela deve ser observada com razoável frequência em todas as vezes em que a demanda for suficientemente alta e em diferentes segmentos de rodovias com características semelhantes. Portanto, a capacidade não corresponde necessariamente ao maior fluxo veicular observado num local caso esse fluxo tenha sido observado uma única vez ou tenha durado por um período muito curto de tempo.
- A capacidade é determinada em termos de uma *taxa de fluxo* de veículos, expressa em veículos por hora e determinada a partir do valor correspondente à razão entre o número de veículos que cruzam a seção em análise num período de tempo, normalmente os 15 minutos mais congestionados de uma hora. No exemplo mostrado na Figura 6, considerando que o maior número de veículos observado (n_2) corresponde à capacidade da via, a taxa de fluxo correspondente à capacidade é determinada como sendo $4 \times n_2$. Deve-se notar que o fluxo será sempre maior ou no mínimo igual ao *volume horário*, que corresponde à soma das quantidades de veículos observadas em cada período de 15 minutos. Portanto, deve-se considerar a existência de variações no volume horário considerando um *fator de hora-pico (FHP)*, que relaciona o volume horário à taxa de fluxo calculada considerando o período de pico de 15 min.

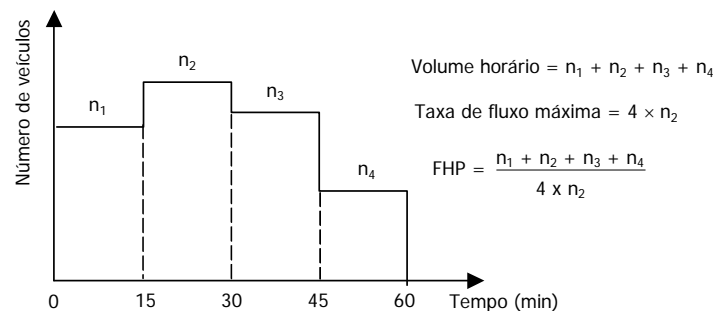


Figura 6: Determinação da taxa de fluxo de tráfego

3.1.1. Relação Fluxo-Velocidade e Capacidade sob Condições Ideais

Todos os estudos mais recentes indicam que em uma rodovia de pista dupla a velocidade não varia em função do volume, se a taxa de fluxo for baixa ou moderada. Isto pode ser verificado na Figura 7, que mostra a relação fluxo-velocidade adotada pelo HCM para segmentos básicos de freeways. Para freeways com velocidade de fluxo livre de 120 km/h, a velocidade não é afetada pelo volume até uma determinada taxa de fluxo, que é maior em freeways com velocidades de fluxo livre menores.

O HCM estipula que a velocidade de fluxo livre deve ser medida no local, como a velocidade média dos automóveis quando a taxa de fluxo for inferior a 1300 veic/h/faixa. A velocidade de fluxo livre pode ser obtida medindo-se a velocidade num ponto ou fazendo-se uma pesquisa de tempo de viagem.

O HCM também ressalta que, embora apenas quatro curvas sejam mostradas na Figura 7, pode-se obter uma relação fluxo-velocidade para qualquer velocidade de fluxo livre no intervalo entre 90 e 130 km/h fazendo uma interpolação entre as curvas da Figura 7.

É importante mencionar que as taxas de fluxo mostradas na Figura 7 são elaboradas para uma corrente de tráfego hipotética, formada por 100% de automóveis, denominados pelo HCM de *carros de passeio equivalentes* (cp). As taxas de fluxo mostradas são, portanto, *fluxos equivalentes*, expressos em carros de passeio por hora (cp/h).

Sendo assim, a capacidade de uma faixa de tráfego, sob condições ideais de tráfego, é 2400 cp/h/faixa numa freeway na qual a velocidade de fluxo livre é maior ou igual a 120 km/h. Para freeways com velocidade de fluxo livre menores que 120 km/h, há uma redução progressiva da capacidade: 2350 cp/h/faixa (110 km/h), 2300 cp/h/faixa (100 km/h) e 2250 cp/h/faixa, se a velocidade de fluxo livre for 90 km/h.

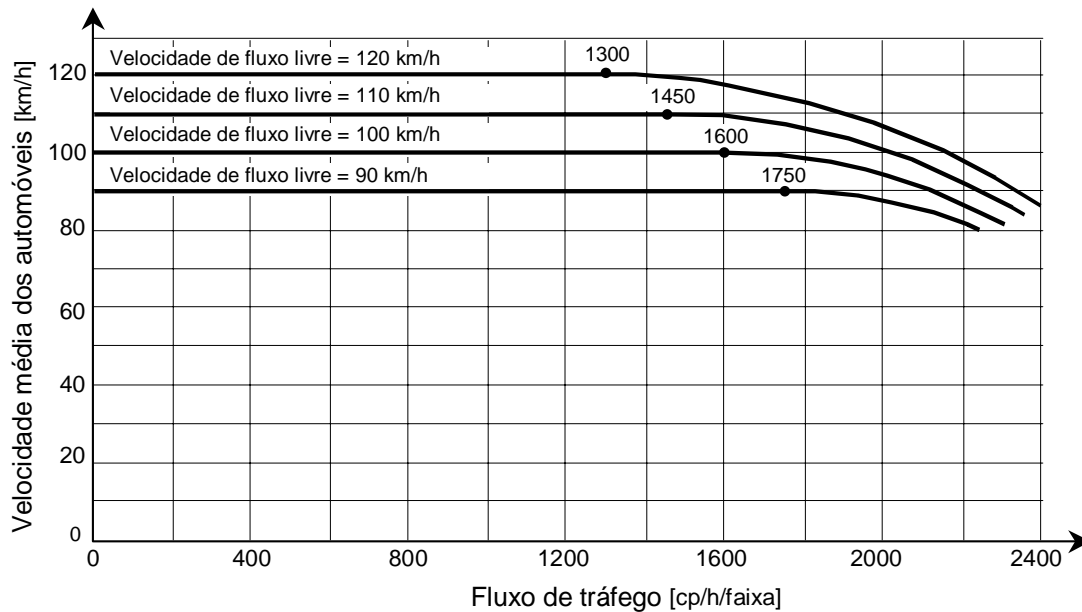


Figura 7: Relações fluxo-velocidade para segmentos básicos de freeways (TRB, 2000, Figura 13-2, p. 13-3)

Outro aspecto que pode ser notado na Figura 7 é a velocidade média dos automóveis na capacidade. Pode-se perceber que a queda na velocidade média é maior para freeways com maior velocidade de fluxo livre. A velocidade média na capacidade é 85 km/h para uma freeway com velocidade de fluxo livre de 120 km/h e 80 km/h para uma freeway com velocidade de fluxo livre de 90 km/h.

As relações fluxo-velocidade para rodovias de pista dupla convencionais (Figura 8) são semelhantes às curvas obtidas nas rodovias expressas. Entretanto, a capacidade dessas rodovias é ligeiramente menor, sendo igual a 2200 cp/h/faixa, para uma velocidade de fluxo livre igual a 100 km/h, reduzindo em 100 cp/h/faixa para cada 10 km/h de redução na velocidade de fluxo livre, ou seja, 2100 cp/h/faixa (90 km/h), 2000 cp/h/faixa (80 km/h) e 1900 cp/h/faixa (70 km/h).

Nas rodovias de pista simples, o HCM considera que a redução da velocidade ocorre linearmente em função do aumento da taxa de fluxo bidirecional (Figura 9), sendo a capacidade da pista igual a 3200 cp/h para ambos os sentidos de tráfego, ou 1700 cp/h para um único sentido.

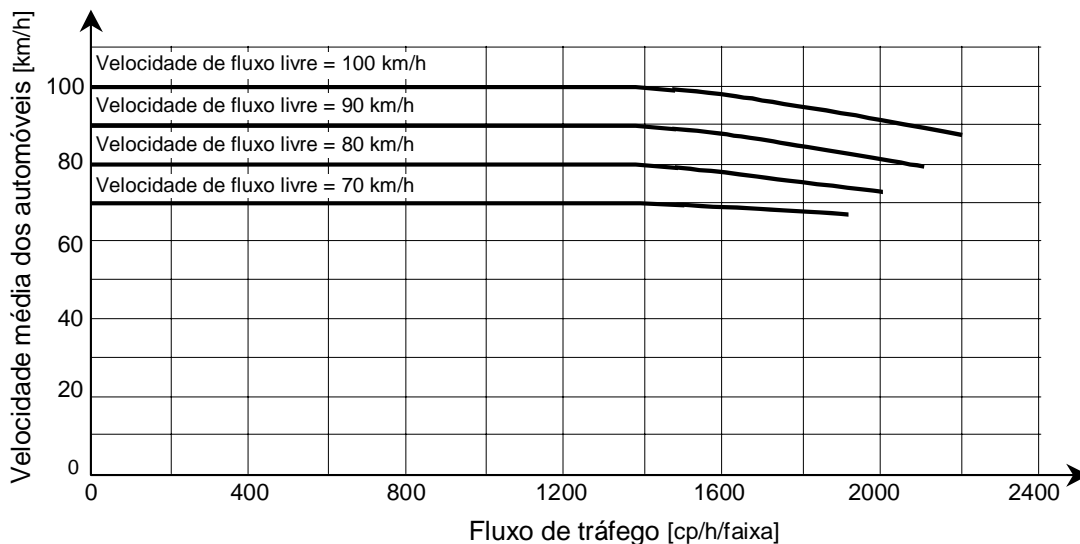


Figura 8: Relações fluxo-velocidade para segmentos básicos rodovias de pista dupla convencionais (TRB, 2000, Figura 12-1, p. 12-4)

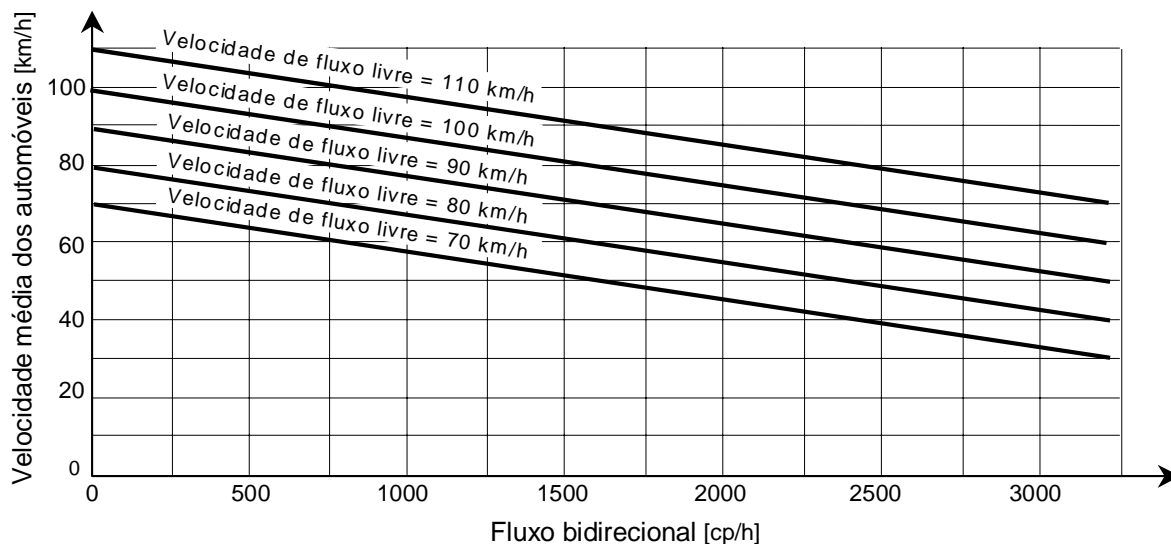


Figura 9: Relações fluxo-velocidade para segmentos básicos de rodovias de pista simples (TRB, 2000, Figura 12-6a, p. 12-14)

3.1.2. Relação entre Fluxo e Porcentagem de Tempo Trafegando em Pelotão

Em rodovias de pista simples, utiliza-se também a relação entre a porcentagem de tempo que os veículos trafegam em pelotão e a taxa de fluxo considerada para ambos os sentidos de tráfego. A Figura 10 apresenta a curva que relaciona essas duas variáveis, elaborada para condições consideradas ideais em uma rodovia de pista simples. A conceituação do parâmetro porcentagem de tempo em pelotão é apresentada no item 4.1.2.

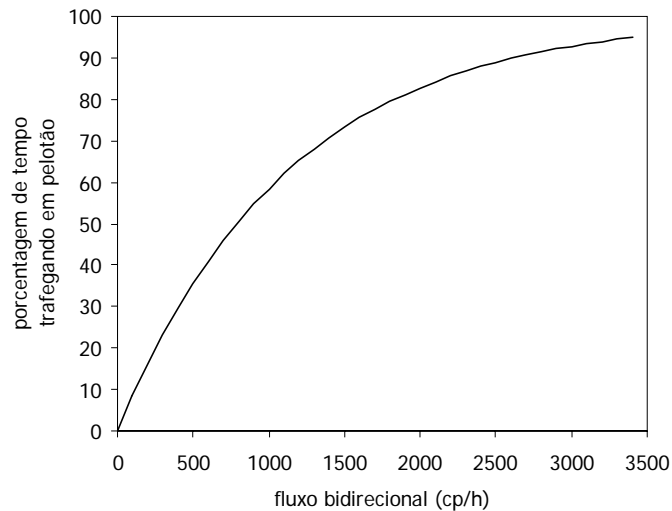


Figura 10: Relação entre fluxo bidirecional e porcentagem de tempo trafegando em pelotões, para condições básicas de tráfego (TRB, 2000, Figura 12-6b, p. 12-14)

4. NÍVEL DE SERVIÇO

Para propósito de análise da operação da rodovia, não é suficiente apenas determinar sua capacidade, pois nesta situação a rodovia encontra-se numa condição em que a interação entre veículos é grande, a mobilidade de cada veículo é comprometida e o fluxo é instável. Em outras palavras, dificilmente uma rodovia seria projetada para operar nessas condições, mas sim para operar em condições que atendam a um determinado nível de qualidade.

Para identificar qual o volume de tráfego que pode transitar pela rodovia de forma que um certo nível de qualidade da operação seja mantido, o HCM utiliza o conceito de *nível de serviço*, uma medida da qualidade das condições operacionais na rodovia, que procura refletir a percepção dos usuários em função de diversos fatores, tais como velocidade e tempo de viagem, liberdade de manobras, interrupções do tráfego, segurança, conforto e conveniência. Um mesmo nível de serviço é mantido até que um volume máximo, denominado *volume de serviço*, seja atingido.

Segundo o HCM, os níveis de serviço em uma rodovia de A a F, sendo que o nível A representa as melhores condições de tráfego e o nível F representa situações de congestionamento. O limite entre os níveis E e F representa a situação correspondente à capacidade da via. Portanto, os níveis de serviço A a E correspondem ao regime de fluxo livre, enquanto que os regimes congestionado e de descarga da fila correspondem ao nível de serviço F.

A Figura 11 mostra situações que representam cada um dos níveis de serviço em um mesmo segmento de uma rodovia de pista dupla, definidos conforme critérios do HCM. Nas rodovias de pista dupla, os níveis de serviço variam de A a F com o aumento do volume e densidade de tráfego e redução da velocidade. Em rodovias de pista simples, variações nos níveis de serviço são acompanhadas por redução na velocidade média de operação e aumento na porcentagem de tempo que os veículos trafegam em pelotões, aguardando por oportunidades para realizar manobras de ultrapassagem.



NS A



NS B



NS C



NS D



NS E



NS F

Figura 11: Caracterização dos níveis de serviço em rodovias de pista dupla
(TRB, 2000, ilustrações 13-5 a 13-9, p. 13-8 e 13-9)

4.1. Medidas de desempenho

O nível de serviço é uma medida qualitativa da qualidade de operação de uma via e, para defini-lo, é necessário definir um ou mais parâmetros mensuráveis que possam descrever as expectativas dos usuários em relação à qualidade operacional da rodovia. Tais parâmetros são denominados *medidas de eficácia* ou *medidas de desempenho* (TRB, 2000), e os níveis de serviço de A a F variam conforme a variação das medidas de desempenho adotadas.

Cada tipo de rodovia utiliza diferentes medidas de desempenho, que procuram refletir as diferentes expectativas dos usuários em relação a qualidade da operação.

4.1.1. Rodovias de Pista Dupla

O HCM considera que, em rodovias de pista dupla, a velocidade dos veículos é um dos fatores que podem ser utilizados na definição do nível de serviço. Entretanto, a proximidade entre veículos e a liberdade que eles têm de realizar manobras de ultrapassagem ou de mudança de

faixa são fatores que certamente refletem a expectativa dos usuários em relação à qualidade da operação. Considerando que a velocidade praticamente não varia para os níveis de serviço A e B, o HCM considera que a *densidade* da corrente de tráfego é mais adequada como medida de desempenho para definição dos níveis de serviço em rodovias de pista dupla. Além do mais, a densidade está diretamente relacionada à proximidade que os veículos trafegam entre si, refletindo de certa forma a maior ou menor liberdade de realizar mudanças de faixa.

4.1.2. Rodovias de Pista Simples

Em rodovias de pista simples, dois parâmetros refletem adequadamente a satisfação dos motoristas em relação à qualidade da operação:

- A *velocidade média de operação*, ou seja, a razão entre a distância de um segmento de rodovia e o tempo médio de percurso dos veículos nesse trecho; e
- A *porcentagem de tempo em pelotão*, ou seja, o percentual de tempo médio em que os veículos trafegam em pelotões numa rodovia, aguardando por uma oportunidade de realizar manobras de ultrapassagem sobre os veículos mais lentos. São considerados trafegando em pelotões todos os veículos cujos headways são menores que 3 segundos.

5. CONDIÇÕES IDEAIS

Conforme já foi mencionado, as curvas fluxo-velocidade são definidas para *condições ideais* ou *básicas*, consideradas como o padrão para a análise da capacidade e nível de serviço de rodovias. Para propósitos de análise, é necessário adotar valores padrão pois seria praticamente impossível estabelecer diferentes relações fluxo-velocidade para um dos cenários de tráfego que seriam obtidos caso fossem consideradas diferentes composições de tráfego, número de faixas, inclinações e comprimentos de greides, números de pontos de acesso, dentre outros fatores. Portanto, é mais razoável ajustar as condições reais para condições ideais através da utilização de fatores de ajuste, que são tabelados para todas as condições observadas nas rodovias.

Dessa forma, as condições ideais para cada tipo de rodovia são listados a seguir.

5.1. Rodovias Expressas (Freeways)

1. a largura mínima das faixas de tráfego é 3,6 m;
2. a largura mínima do acostamento (ou distância da borda da pista até uma obstrução) no lado direito é de 1,8 m e no lado esquerdo (próximo ao canteiro central) é de 0,6 m;
3. existem pelo menos 10 faixas de tráfego (5 em cada direção);
4. o espaçamento mínimo entre dispositivos de acesso é 3 km;
5. o tráfego é composto apenas por automóveis, que são os veículos de quatro pneus, denominados também de *carros de passeio* (cp);
6. a topografia é plana, sem rampas maiores que 2%; e
7. a maioria dos usuários está familiarizada com a via.

5.2. Rodovias de Pista Dupla Convencionais

1. a largura mínima das faixas de tráfego é 3,6 m;

2. a soma das larguras do acostamento no lado direito e esquerdo (ou soma das distâncias entre a borda da pista e um obstáculo qualquer) é maior ou igual a 3,6 m;
3. as pistas são separadas por algum tipo de dispositivo físico no canteiro central;
4. não existem pontos de acesso na rodovia, tais como interseções em nível, pontos de entrada e saída de veículos nas laterais da pista;
5. a velocidade de fluxo livre é maior do que 100 km/h;
6. o tráfego é composto apenas por automóveis, que são os veículos de quatro pneus, denominados também de *carros de passeio* (cp);
7. a maioria dos usuários está familiarizada com a via.

5.3. Rodovias de Pista Simples

1. a largura mínima das faixas de tráfego é 3,6 m;
2. a largura mínima do acostamento (ou distância da borda externa da pista até um obstáculo lateral) é de 1,8 m;
3. não existem pontos de acesso na rodovia, tais como interseções em nível, pontos de entrada e saída de veículos nas laterais da pista;
4. não existem trechos em que a ultrapassagem é proibida;
5. tráfego é composto apenas por automóveis, ou *carros de passeio* (cp);
6. não existe impedimento ao movimento dos veículos, tais como elementos de controle de tráfego (semáforos, placas de sinalização) ou conversões; e
7. relevo é plano, sem rampas maiores que 2%.

Os fatores mencionados podem ser classificados em três categorias, em função do impacto causado na 1) velocidade de fluxo livre; 2) no fluxo de tráfego; e 3) na porcentagem de tempo que os veículos trafegam em pelotões. Cada conjunto de fatores é descrito a seguir.

5.4. Fatores que afetam a Velocidade de Fluxo Livre

Largura das Faixas de Tráfego e dos Acostamentos

Dentre os fatores que afetam a velocidade de fluxo livre, os principais são a largura das faixas e dos acostamentos, ou ainda a presença de obstáculos na lateral da pista, afetam diretamente a velocidade de fluxo da rodovia. Os muros e barreiras mostrados na Figura 12 fazem com que os veículos posicionem-se mais próximos à faixa central da via, causando eventualmente maior interação com os veículos posicionados nas outras faixas. Por outro lado, o segmento de freeway mostrado na Figura 1 possui faixas e acostamentos que podem ser considerados como ideais, apesar da existência de uma barreira metálica no canteiro central



Figura 12: Efeito de obstruções laterais no comportamento dos veículos
(TRB, 2000, Ilustração 13-1, p. 13-6)

para separação das duas pistas.

Tipo de Separação entre Pistas

Em rodovias de pista dupla convencionais, a presença de pilares de viadutos no canteiro central (Figura 13) ou a inexistência de separação física entre pistas (Figura 14) também afetam a velocidade de fluxo livre.

Número de Faixas de Tráfego

Nas freeways, a velocidade de fluxo livre também é influenciada pelo número de faixas de tráfego, pois quanto maior o número de faixas, mais facilmente os motoristas podem se posicionar para evitar os efeitos dos veículos mais lentos, que costumam se posicionar nas faixas mais à direita.

Densidade de Dispositivos de Entrocamento ou Pontos de Acesso

Outros fatores que afetam a velocidade de fluxo livre são a densidade de dispositivos de entrocamento nas freeways e o número de pontos de acesso em nível nas rodovias de pista dupla convencionais e rodovias de pista simples. Nas freeways, as manobras de entrelaçamento associadas com trevos afetam o fluxo de tráfego e freeways com entradas e saídas pouco espaçadas (normalmente situadas em zonas densamente urbanizadas), operando assim com velocidades de fluxo livre inferiores às encontradas em freeways suburbanas ou rurais.

Porcentagem de Trechos com Ultrapassagem Proibida

Nas rodovias de pista simples, a porcentagem de trechos em que a ultrapassagem é proibida tende a aumentar a probabilidade de veículos trafegarem em pelotões, atrás de veículos mais lentos, reduzindo a velocidade média de operação e, conseqüentemente, influenciando a velocidade de fluxo livre.

Velocidade de Projeto e Limite de Velocidade

A velocidade de projeto e os alinhamentos vertical e horizontal podem interferir na velocidade de fluxo livre. O HCM sugere que, nos casos em que se suspeita que esses fatores possam influir na velocidade de fluxo livre, deve-se obter uma estimativa da velocidade de fluxo livre diretamente no campo, para fluxos leves de tráfego.

Em rodovias próximas a regiões urbanas, a utilização de limites de velocidade não muito elevados (entre 60 e 80 km/h), também afeta a velocidade de fluxo livre que, em geral, é cerca de 5 a 10 km/h maior que o limite de velocidade.



Figura 13: Obstrução central em uma rodovia de pista dupla convencional (TRB, 2000, Ilustração 12-5, p. 12-4)



Figura 14: Rodovia de pista dupla convencional sem separação física entre pistas (TRB, 2000, Ilustração 12-3, p. 12-2)

5.5. Fatores que afetam o Fluxo de Tráfego

Fator de Hora-Pico

O fator de hora-pico representa a variação do fluxo de tráfego durante o período de 1 h em que é observado o maior volume de tráfego. Observações em campo demonstram que, em geral, a taxa de fluxo para um período de 15 min de pico não são mantidas para todo o período da hora pico. Dessa forma, o dimensionamento de qualquer componente do sistema de transporte deve levar em conta a variação do fluxo de tráfego, evitando assim que a demanda do período de pico supere a capacidade definida para o componente em questão.

Desempenho dos Automóveis em Aclives

Em geral, o impacto das rampas ascendentes é pouco significativo se a corrente de tráfego é formada somente por automóveis, de forma que a análise para rodovias de pista dupla despreza esse fator. Somente para rodovia de pista simples considera-se que os automóveis sofram redução em suas velocidades, reduzindo a capacidade de escoamento da rodovia.

No entanto, o desempenho dos veículos pesados em rampas ascendentes e descendentes é um dos aspectos de maior influência na determinação das taxas de fluxo equivalente. Esse fator é explicado a seguir.

Presença de Veículos Pesados

Os veículos pesados (caminhões e ônibus) e veículos recreacionais (automóvel + reboque) causam impactos na operação das rodovias (ver Figura 15), pois as maiores dimensões desses veículos, quando comparados aos automóveis, influem diretamente no número de veículos que uma faixa de tráfego comporta em uma determinada condição de tráfego. Além disso, o desempenho inferior dos veículos pesados produz maior interação entre veículos na corrente de tráfego, obrigando os automóveis, que possuem melhor desempenho, a mudarem de faixa ou realizarem manobras de ultrapassagem mais constantemente. Quando os automóveis mudam de faixa, eventualmente surgem espaços vazios entre dois veículos pesados que trafegam em uma mesma faixa, produzindo uma sub-utilização do espaço viário.



Figura 15: Impacto dos caminhões na corrente de tráfego (TRB, 2000, Ilustração 13-4, p. 13-7)

Quando os automóveis mudam de faixa, eventualmente surgem espaços vazios entre dois veículos pesados que trafegam em uma mesma faixa, produzindo uma sub-utilização do espaço viário.

Dessa forma, o HCM utiliza *fatores de equivalência veicular* para refletir o impacto operacional dos caminhões, ônibus e veículos recreacionais. A função do fator de equivalência é converter um fluxo de tráfego real, formado por diferentes tipos de veículos, em um fluxo hipotético, composto apenas por carros de passeio equivalentes, de forma que a análise de capacidade e nível de serviço pode ser padronizada em função de um único tipo de veículo. Quanto maior o fator de equivalência, maior o valor do fluxo equivalente e, em consequência disso, pode haver redução no nível de serviço operacional.

Os equivalentes veiculares surgem de uma relação de equivalência entre um *fluxo composto* q , formado por automóveis e veículos pesados, e um *fluxo básico* q_b , formado somente por automóveis, desconsiderando outros fatores que possam afetar as condições ideais de operação em uma rodovia:

$$q_b = q(1 - p_T - p_R) + qp_T E_T + qp_R E_R \quad (2)$$

em que q_b : taxa de fluxo equivalente, sob condições ideais ou básicas (cp/h);
 q : taxa de fluxo composta por automóveis e veículos pesados (veíc/h);
 p_T : porcentagem de caminhões e ônibus no fluxo composto;
 p_R : porcentagem de veículos recreacionais no fluxo composto;
 E_T : fator de equivalência veicular para caminhões e ônibus;
 E_R : fator de equivalência veicular para veículos recreacionais.

Na equação (2), a porcentagem de automóveis é $(1 - p)$ e caminhões e ônibus são agrupados em uma mesma categoria pois o HCM considera que esses veículos tem dimensões e desempenho semelhantes.

Para melhor explicar o conceito de equivalência veicular, a Figura 16 mostra um corrente de tráfego composta por 4 veículos, dos quais um deles é um caminhão e os outros são automóveis, e outra corrente formada somente por 5 automóveis. Considerando que ambos os fluxos são equivalentes, pode ser definido um *fator de ajuste para veículos pesados* (f_{HV}), que nada mais é do que a relação entre o fluxo composto e o fluxo básico, formado só por automóveis:

$$f_{HV} = \frac{q}{q_b} = \frac{1}{1 + p_T(E_T - 1) + p_R(E_R - 1)} \quad (3)$$

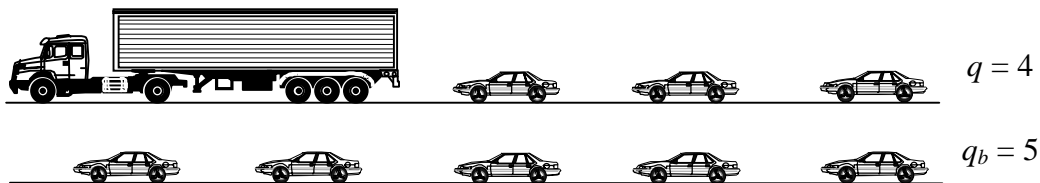


Figura 16: Exemplo de determinação da equivalência veicular

No caso da Figura 16, verifica-se que $p_T = 0,25$, $q = 4$, $q_b = 5$. Portanto, $f_{HV} = 0,8$ e o fator de equivalência do caminhão é dado por:

$$\frac{4}{5} = \frac{1}{1 + 0,25(E_T - 1)} \Rightarrow E_T = 2 \quad (4)$$

indicando que o caminhão equivale a dois automóveis, ou carros de passeio equivalentes (cp).

O HCM apresenta tabelas contendo os equivalentes veiculares para caminhões, ônibus e veículos recreacionais. As tabelas foram elaboradas levando em conta a relação massa/potência dos veículos típicos americanos. Assim, a massa/potência dos caminhões e ônibus varia entre 75 e 90 kg/kW nas freeways e é igual a 100 kg/kW nas rodovias de pista dupla convencionais. A massa/potência dos veículos recreacionais varia em torno de 20 a 40 kg/kW.

São apresentados dois conjuntos de tabelas, um para trechos genéricos de rodovias,

outro para rampas específicas. O HCM recomenda que o trecho analisado possa ser considerado como genérico somente quando não existirem rampas maiores ou mais íngrimes que os valores mostrados na Tabela 1. Deve ser observado que são recomendados valores diferentes para rodovias de pista dupla do tipo expressas e convencionais.

Os trechos genéricos podem ser classificados de acordo com o tipo de relevo predominante:

- *Plano*: qualquer combinação de alinhamentos horizontal e vertical que permitem aos veículos pesados manter desempenho similar ao desempenho dos automóveis. Este tipo de terreno pode possuir rampas de pequena extensão, com inclinações não superiores a 1% ou 2%;
- *Ondulado*: qualquer combinação de alinhamentos horizontal e vertical que faz com que os veículos pesados apresentem redução razoável de velocidade em relação aos automóveis, mas que não faz com que os veículos pesados cheguem a trafegar frequentemente na velocidade de equilíbrio;
- *Montanhoso*: qualquer combinação de alinhamentos horizontal e vertical que causa redução significativa na velocidade dos veículos pesados, de tal forma que esses cheguem a trafegar frequentemente ou por grandes extensões na velocidade de equilíbrio.

Tabela 1: Diretrizes para utilização dos procedimentos para trechos genéricos

Tipo de rodovia	Características dos aclives		Características dos declives	
	Comprimento (km)	Inclinação (%)	Comprimento (km)	Inclinação (%)
Pista dupla expressa (freeway)	$\leq 1,0$	< 3	$\leq 3,2$	< 4
	$\leq 0,5$	≥ 3		
Pista dupla convencional (multilane highway)	$\leq 1,6$	≤ 3	$\leq 3,2$	< 4
	$\leq 0,8$	> 3		
Pista simples	$< 1,0$	< 3	$< 1,0$	< 3

Um detalhe importante a ser notado é que no caso de rodovias de pista simples, os procedimentos para trechos genéricos só são aplicados em relevos planos ou ondulados. Para trechos montanhosos, utiliza-se o procedimento para rampas específicas. Os equivalentes para trechos genéricos podem ainda ser utilizados na de projeto de uma nova rodovia, quando ainda não se tem uma idéia exata do comprimento e magnitude das rampas. No entanto, quando o comprimento e a magnitude das rampas são conhecidos, são utilizadas tabelas para rampas específicas, nas quais os equivalentes variam em função da magnitude do greide, do comprimento do greide e em função da porcentagem de veículos pesados e recreacionais na corrente de tráfego.

Tipo de Motorista

Alguns estudos demonstram que motoristas que não estão acostumados a trafegar em uma determinada rodovia comportam-se de forma diferente daqueles motoristas que fazem uso da rodovia de forma cotidiana. Quando o tráfego tem por objetivo principal as atividades de lazer, a capacidade da rodovia pode ser de 10 a 15% menor do que a capacidade estimada para a corrente de tráfego cujo propósito principal são as viagens por motivo trabalho. Portanto, é

necessário introduzir ajustes no na taxa básica de fluxo sempre que existir uma parcela representativa de veículos cujos motoristas não estão habituados à utilização da rodovia.

5.6. Fatores que afetam a Porcentagem de Tempo Trafegando em Pelotão

Porcentagem de Trechos com Ultrapassagem Proibida

Conforme já mencionado, a porcentagem de trechos em que a ultrapassagem é proibida nas rodovias de pista simples aumenta porcentagem de tempo em que os veículos trafegam em pelotões.

Distribuição Direcional do Tráfego

A distribuição do tráfego por sentido nas rodovias de pista simples também influencia o tempo que os veículos trafegam em pelotão, pois quando o volume de tráfego no sentido oposto aumenta, o número de oportunidades para a realização de manobras de ultrapassagem sobre veículos mais lentos diminui, aumentando a porcentagem de tempo em pelotão.